

ilmedia


TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Erbe, Torsten; Frank, Astrid; Spiller, Frank ; Theska, René:

***Strukturauswahl von Positioniersystemen durch Betrachtung
der Funktionstopologie***

Publikation entstand im Rahmen der Veranstaltung:

Mechatronik 2009: Komplexität beherrschen, Methoden und Lösungen aus der
Praxis für die Praxis; Wiesloch bei Heidelberg, 12. und 13. Mai 2009

Strukturauswahl von Positioniersystemen durch Betrachtung der Funktionstopologie

Dipl.-Ing. **T. Erbe**, Technische Universität Ilmenau

Dipl.-Math. **A. Frank**, IMMS gGmbH, Ilmenau

Dr.-Ing. **F. Spiller**, IMMS gGmbH, Ilmenau

Prof. Dr.-Ing. **R. Theska**, Technische Universität Ilmenau

Kurzfassung

Beim Entwurf von Positioniersystemen ist den einander widersprechenden Forderungen nach hoher Dynamik und hoher Präzision der Bewegung Rechnung zu tragen. Neben der optimalen Erfüllung der hohen Anforderungen an Antriebs- und Messsysteme als die wesentlichen Funktionselemente wird beim Entwurf eine möglichst geringe gegenseitige Beeinflussung dieser Teilsysteme angestrebt. Insbesondere bei mehrachsigen Positionieraufgaben, wie sie in Bearbeitungs- oder Messsystemen notwendig sind, ist eine Entkopplung der Teilfunktionen eines Systems nicht mehr vollständig möglich. Deshalb erlangt die Wahl der Funktionstopologie große Bedeutung.

Auf der Abstraktionsebene der Funktionstopologie ist eine systematische und vollständige Erfassung des Lösungsraums aller funktionellen Koppelstellen und Anordnungen der Funktionselemente möglich. Durch Betrachtung dieser Relationen der vorhandenen Teilfunktionen kann im Rahmen der Synthese eine Abschätzung der minimalen Anzahl an funktionellen Koppelstellen des Gesamtsystems erfolgen. Damit wird die Zahl der Systemkopplungen schon im Entwurfsprozess minimiert und somit die Wahl einer optimalen Struktur erreicht.

Der Beitrag stellt am Beispiel eines mehrachsigen Positioniersystems ein Konzept für die Bewertung in frühen Entwurfsphasen durch Betrachtung der Funktionstopologie vor.

1. Einleitung - Motivation

Beim Entwurf von Positioniersystemen ist einer Vielzahl unterschiedlicher und zum Teil gegenläufiger Anforderungen – z. B. hohe Bahngenauigkeit und hohe Dynamik - Rechnung zu tragen. Ein Ziel bei der Konzeption des Systems ist es dabei, die gegenseitige Störbeeinflussung von Subsystemen zu vermeiden oder zumindest zu verringern [1].

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung geförderten Wachstumskernes VERDIAN werden unter anderem Positioniersysteme mit Anforderungen an Positionier- und Bahngenauigkeiten im Submikrometerbereich sowie hohe Beschleunigungen

und Bahngeschwindigkeiten entwickelt. Um diese Forderungen erfüllen zu können, ist die Verringerung oder besser Vermeidung gegenseitige Störbeeinflussung erforderlich und neben der Gestalt und Anordnung der Bauteile und Koppelstellen auch die Zahl der Koppelstellen zu optimieren [2].

Entsprechend den Stufen des Entwicklungsprozesses ist die Funktionstopologie [3] das früheste Stadium des Entwurfes, in dem eine Verringerung der gegenseitigen Einflüsse und eine Reduzierung der Koppelstellen möglich sind.

2. Beispiel - planares Positioniersystem

Planare Positioniersysteme (PPS) erlauben eine Bewegung in bis zu drei DOF (x - y - φ_z ; vgl. Bild 1) und sind ein typisches Beispiel für ein mechatronisches System. Anwendung finden PPS häufig in der Präzisionslaserbearbeitung sowie in der Halbleiterindustrie. Das Gestell und das Bewegungssystem, bestehend aus den Antriebs- und Messsystemen, sind die wesentlichen Bestandteile und heterogene Subsysteme eines PPS.

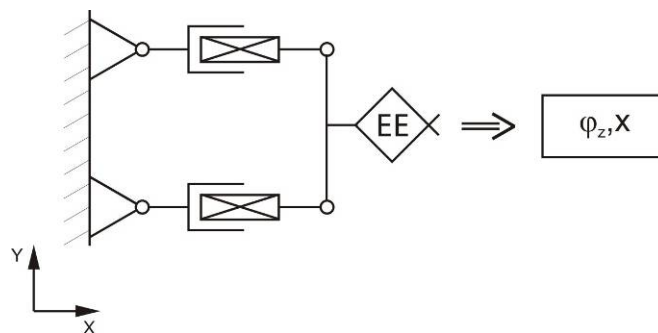


Bild 1 Unterscheidung zwischen Antriebs- und Bewegungssystem: Ein aus zwei linearen Antriebssystemen bestehendes φ_z -Bewegungssystem

Eine planare Positionierung ist durch verschiedene Direktantriebe und Kinematiken realisierbar (vgl. Bild 2). Die Art des Antriebes ist auf der Entwurfsstufe der Funktionstopologie noch nicht definiert und wird deshalb allgemein als Bewegungssystem mit einem Freiheitsgrad (1,2, ..., 6) aufgefasst.

Wesentliche Kriterien zur Bewertung von Lösungsvarianten von PPS sind Arbeitsvolumen, Aufstellfläche des PPS, Mess- und Positionierauflösung, Verfahrensgeschwindigkeiten etc., die je nach Anwendungsfall eine bestimmte Gewichtung erfahren. Für hohe Anforderungen an Dynamik und Auflösung eines PPS sind die dynamische Steifigkeit und das Vermeiden einer gegenseitigen Beeinflussung von Mess- und Antriebssystem wesentliche Optimierungskriterien [vgl. 4, 5].

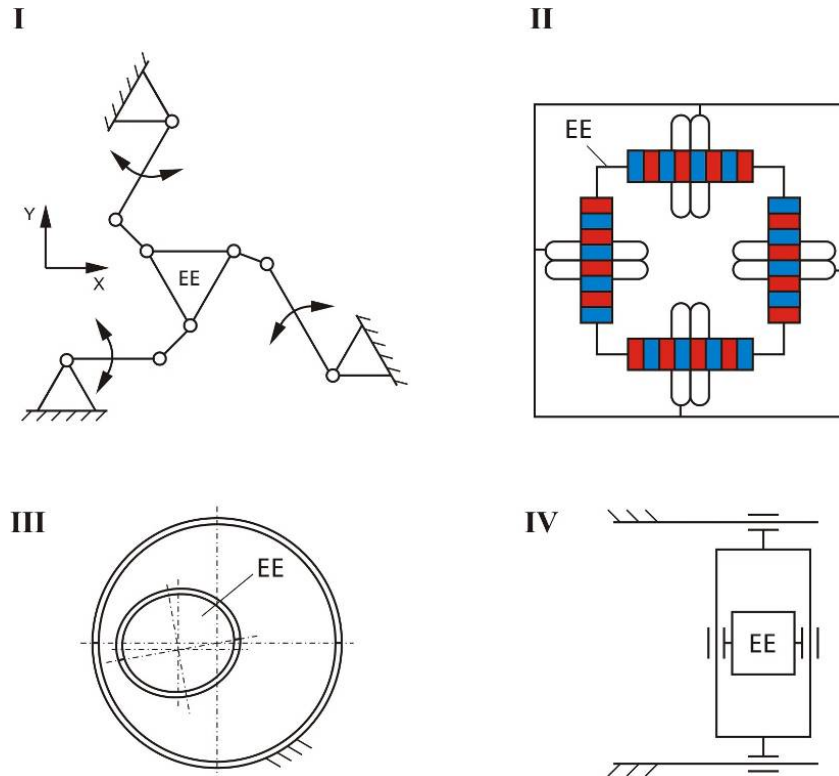


Bild 2. Auswahl möglicher planarer Positioniersysteme:

- I. Parallelkinematik mit drei Drehantrieben,
- II. elektromagnetisches Direktantriebssystem,
- III. offene kinematische Kette mit drei seriellen Drehantrieben,
- IV. serielle Kinematik mit Linearantrieben

3. Grundlagen zur Funktionstopologie

Unter der Funktionstopologie wird die aus den grundlegenden Subsystemen und ihren Kopplungen bestehende Beschreibung des Gesamtsystems verstanden; sie bildet damit die erste Präzisierung der Gesamtfunktion. Aufgrund der, einem heterogenen System eigenen, verschiedenen Unterfunktionen lässt sich die Gesamtfunktion i. d. R. leicht in der beschriebenen Weise präzisieren.

Die Betrachtung der Funktionstopologie ermöglicht eine Optimierung der Zahl und Anordnung der funktionellen Kopplungen der verschiedenen Unterfunktionen eines heterogenen Systems in der Funktionsstruktur. Da jede funktionelle Kopplung mindestens einer Koppelstelle im technischen System entspricht, sind damit eine untere Abschätzung der Zahl der Koppelstellen zwischen den Subsystemen und somit eine Optimierung möglich.

Jedes technische System besteht aus Elementen und Relationen dieser Elemente zueinander. Die Relationen können in Anordnungen und Kopplungen unterschieden werden (vgl.

Bild 3). Für die Funktionsstruktur sind dies Funktionselemente und funktionelle Anordnungen bzw. Kopplungen. Bei der Gestalt des Systems spricht man von Bauelementen bzw. Baugruppen und Koppelstellen [3, 6].

Die Aufgabe einer funktionellen Kopplung ist die Übertragung mindestens einer Funktionsgröße. Aus diesem Grund impliziert jede funktionelle Kopplung - mindestens -eine Koppelstelle im Entwurf.

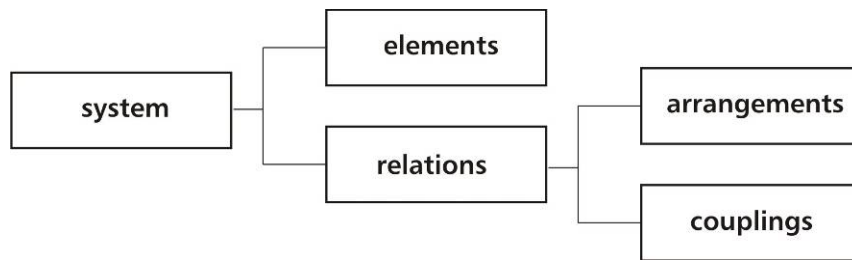


Bild 3 Grundbestandteile einer technischen Struktur

Die kleinstmögliche Anzahl an funktionellen Kopplungen in einem heterogenen System ist durch die Zahl der heterogenen Teilsysteme bestimmt und kann durch das Aufstellen der Funktionstopologie ermittelt werden. Durch Veränderung der Funktionstopologie können die Anzahl und Anordnungen der funktionellen Kopplungen den Anforderungen entsprechend optimiert werden. So kann eine hohe Anzahl von Koppelstellen zwischen zwei Subsystemen die gegenseitige Beeinflussung minimieren und eine Verringerung der Zahl der Koppelstellen die Steifigkeit der Verbindung der beiden betrachteten Subsysteme, aber ggf. auch des Gesamtsystems, erhöhen.

4 Methode

Die Grundannahme der Topologieoptimierung besteht in der Unvereinbarkeit heterogener Teilfunktionen. Kopplungen an andere Subsysteme (etwa Kontrollsysteme, siehe Beispiel) werden nicht betrachtet. Damit kann die Gesamtstruktur in lineare Strukturen mit verschiedenen Ebenen transformiert (vgl. Bild 4) und algorithmisch behandelt werden.

Zur Erstellung einer Topologie von Funktionselementen für die Erfüllung einer gegebenen Funktion wurden die folgenden Algorithmen aufgestellt, um (bei Vermeidung von Redundanzen) alle Strukturen zu bestimmen, die aus einer gegebenen Multimenge (einer Menge, die beliebige Vielfachheiten ihrer Elemente erlaubt) von Unterfunktionen (z. B. Antrieb und Messung) erzeugt werden können. Zudem werden die auftretenden Kopplungen auf der funktionstopologischen Ebene in jeder Lösung gezählt. Die Menge der Antriebs- und Mess-Teilfunktionen besteht aus den translatorischen Elementen x , y , z mit Achsen in den drei Raum-

richtungen und den rotatorischen Elementen φ_x , φ_y , φ_z mit den Achsen in den indizierten Richtungen.

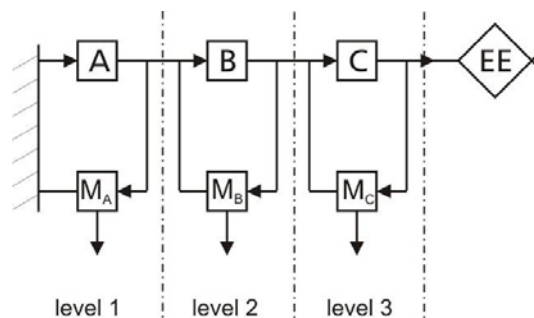


Bild 4. Prinzip der Transformation in lineare Strukturen

Der erste Algorithmus reproduziert die Gesamtheit der möglichen Strukturen aus einer gegebenen Multimenge L einzelner Antriebssysteme. Er benötigt als Input die Multimenge L und die minimale Anzahl einzelner Antriebssysteme, die an das Gestell gekoppelt sein sollen. Es gibt technische (s. Abschn. 5) und formal mathematische Restriktionen, deren Einhaltung sicherstellt, dass mit der gegebenen Multimenge eine sinnvolle Anordnung möglich ist. Um den kompletten Lösungsraum aufzustellen, führt der Algorithmus eine Rekursion durch, die kombinatorische Gesetzmäßigkeiten ausnutzt.

Zunächst werden die Lösungsräume für $k=1, 2, 3$ Elemente manuell unter Berücksichtigung der Anforderungen aufgelistet (die vollständige Liste ist der detaillierten Beschreibung zu entnehmen). Für $k=4, 5, 6$ wird die Gesamtheit der Anordnungen aus genau k Elementen aus den bereits erzeugten Lösungsräumen für $k-1$ Elemente aufgebaut, wobei jede Kombination von $k-1$ Elementen der gegebenen k -Menge betrachtet und das verbleibende Element auf jede denkbare Weise an jede der $k-1$ -Lösungen gekoppelt wird.

Ferner wird die Mächtigkeit von L als $n=6r+s$ ($s<6$) dargestellt. Eine vollständige Lösung wird aus r Sub-Strukturen mit jeweils 6 Elementen und einer Substruktur aus s Elementen zusammengesetzt. Dabei wird auf die bereits erzeugten Lösungen für $k=1, \dots, 6$ Elemente zurückgegriffen.

Ein Großteil des Algorithmus besteht in der Auswahl 6-elementiger Strukturen, die in einer sinnvollen Anordnung zusammengefügt werden können, dem Verwerfen erfolgloser Versuche und der Speicherung vielversprechender Ansätze.

Die Unterfunktionen, die während dieses Prozesses miteinander verbunden werden, werden entsprechend den Ebenen indiziert, auf denen sie relativ zum Gestell angeordnet sind. Hier machen die Elemente, die direkt an das Gestell gekoppelt sind, die niedrigste Ebene aus. Die Vielfalt der Anordnungen resultiert u. a. aus der Möglichkeit, Antriebssysteme, die ursprünglich auf derselben Ebene platziert waren, zu vereinigen. Diese Möglichkeit wird wie-

derum durch die Anforderung der Nicht-Redundanz beschränkt. Die Gesamtanzahl der Elemente auf einer Ebene ist auf 6 beschränkt, da jede Art von Einzelantrieb auf jeder Ebene höchstens einmal vorkommen kann. Diese Einschränkung führt zur Wahl 6-elementiger Substrukturen.

Jede der durch den ersten Algorithmus erzeugte Lösung erlaubt eine Anzahl von Anordnungen seiner zugehörigen Messsysteme. Ein Messsystem kann auf derselben Ebene wie sein zugehöriges Antriebssystem oder auf irgendeiner niedrigeren Ebene angeordnet werden. Außerdem erlauben bestimmte Anordnungen von Antriebssystemen gewisse Umordnungen ihrer Messsysteme.

Da Messsysteme auf jeder Ebene beliebig platziert und vereinigt werden können, beginnt der zweite Algorithmus mit einer Struktur, die alle Messsysteme zu einer gegebenen Lösung auf der niedrigsten Ebene vereinigt. Dann werden die Messsysteme, die zu Antriebssystemen auf höheren Ebenen gehören, nacheinander auf den entsprechenden Ebenen angeordnet, beginnend mit Ebene 2. Für jede auf diese Weise neu erzeugte Struktur werden alle möglichen Unterstrukturen der Messsysteme, auch auf den unteren Ebenen, gebildet.

Um optimale Strukturen in Hinblick auf die Anzahl der Kopplungen zwischen jeweils zwei Elementen (Einzelantrieben oder Messsystemen) zu erhalten, wird die Anzahl der Koppelstellen zwischen je zwei Elementen bestimmt und für jede Lösung oder Teillösung in einer Matrix dokumentiert. Diese Matrizen entwickeln sich im Ablauf des Algorithmus aus einander.

5 Möglichkeiten und Restriktionen für Anordnungen in Positioniersystemen

Grundsätzlich ist eine Vielzahl verschiedener Antriebs- und Messsystemanordnungen denkbar (vgl. Bild 5). Die Variation der Anordnungen der Funktionselemente ist durch die Abhängigkeiten der Subsysteme voneinander beschränkt. Solche Abhängigkeiten bestehen zwischen Systemen gleicher Art bzw. zwischen heterogenen Subsystemen.

Im Falle der Positioniersysteme bedeutet das u. a., dass Mess- und Antriebsachse – auf der Abstraktionsebene der Funktionstopologie – übereinstimmen müssen. Damit werden die Anordnungsvarianten der Messsysteme durch die zugehörige Antriebsanordnung begrenzt und umgekehrt.

Für die Anordnung von Messsystemen sich u.a. Verschiebungen innerhalb bestimmter Ketten möglich. Unter einer Kette versteht man die serielle Schaltung ungleichnamiger Translations- und beliebig vieler gleichnamiger Rotationsantriebe, wobei die (Un-)Gleichnamigkeit zwischen Translations- und Rotationsantrieben wesentlich ist. In Ketten der ersten beiden Arten (Bild 6.I, II) können Messsysteme von höheren beliebig auf niedrigeren Ebenen, d. h.

„näher“ am Gestell angeordnet werden, womit die Zahl der Koppelstellen reduziert werden kann.

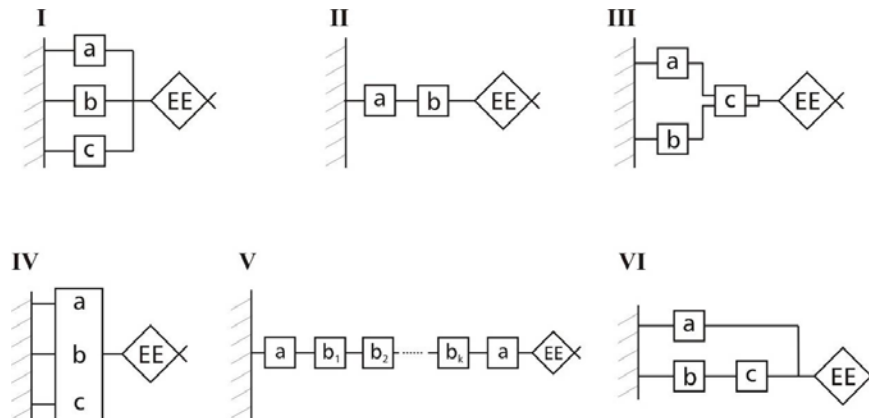


Bild 5: Mögliche Elementtopologien (EE ... Endeffektor)

- I. Parallele Anordnung von Antriebssystemen
- II. Serielle Anordnung
- III. Parallele Anordnung auf der ersten Ebene mit Einzelantrieb auf der zweiten
- IV. Vereinigen von Antrieben
- V. Serielle Anordnung mit zwei gleichnamigen Linearantrieben
- VI. Bypass

In Ketten der dritten, vierten und fünften Art kann das c -Messsystem auf einer beliebigen tieferen und in Ketten der sechsten Art kann φ_c auf der niedrigeren Ebene angeordnet werden. Selbiges kann umgekehrt auch für die Antriebsanordnungen durchgeführt werden. Der Algorithmus berücksichtigt dies.

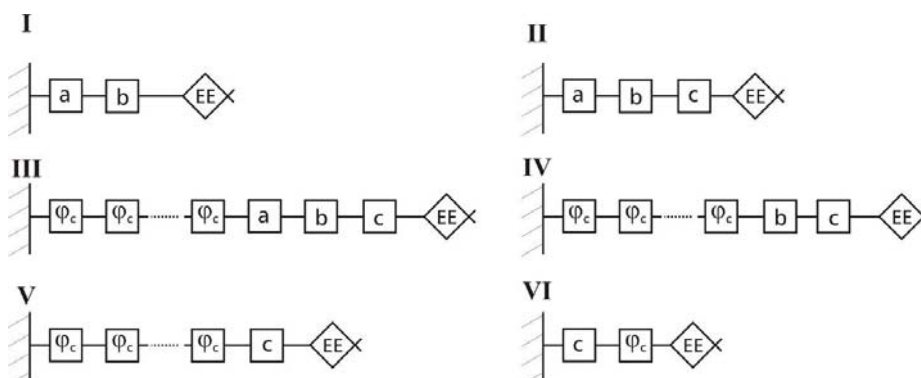


Bild 6: Kettenarten

6 Schlussfolgerungen

Für ein beispielhaftes Positionierproblem (X-, Y-, Z-translatorische Bewegung) ergibt die Methode 610 verschiedene Anordnungsmöglichkeiten der insgesamt sechs Antriebs- und Messsysteme und liefert die Anzahl aller Koppelstellen zwischen zwei beliebigen Elementen für jede mögliche Anordnung.

Die Betrachtung der Funktionstopologie ermöglicht eine systematische Suche nach Funktionsstrukturen mit der Möglichkeit der Bewertung der gegenseitigen Beeinflussung der Unterfunktionen über die Systemkoppelstellen. Dieses Vorgehen ermöglicht das Aufstellen geeigneter Strukturen durch Auswahl der gemäß den Anforderungen optimalen Koppelstellenanordnung auf der Ebene der Funktionsstruktur unter Berücksichtigung aller möglichen Anordnungen der gewählten Subsysteme.

Eine weitere Bewertung des Konzeptes heterogener Systeme erfordert die Kenntnis von Charakteristika, die von den Eigenschaften der speziellen Gestaltung abhängen.

Die benutzten Algorithmen können grundsätzlich auch auf Systeme angewendet werden, die andere heterogene Subsysteme enthalten.

Literaturhinweise

- [1] Kallenbach, E., et. al.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. VDI-Berichte; 1315, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [2] Lotz, M.; Frank, T.; Hackel, T.; Höhne, G.; Theska, R.: Konstruktionsprinzipien zum Entwurf von Nanopositioniermaschinen, IWK-Ilmenau, 2005
- [3] Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft. 1.Auflage, Berlin: Verlag Technik, 1974
- [4] Kallenbach, E.: Systementwurf – Methoden zum systematischen Entwurf mechatronischer Produkte des Maschinenbaus. Mechatronik-Workshop, VDI/VDE: Handbuch Mechatronik-Workshop, 6. -7. March 2001, Düsseldorf; 25. – 26. September, Stuttgart
- [5] Theska, R., Frank Th., Hackel T., Höhne G., Lotz M.: Methodical Approach for Performance Rating During the Design Process of Precision Machines. In: 15th International Conference on Engineering Design (2005)
- [6] Erbe, T.; Ströhla, T.; Rosenbaum, S.; Hüfner, T.; Król, J.; Theska, R.: Weiterentwicklung von Entwurfsmethodiken für mechatronische Systeme. 2.VERDIAN-Statusmeeting, 12. September 2008, Ilmenau